

원자력 발전소 모터구동밸브의 쓰러스트/토크 신호 분석

류호근* · 박성근* · 김대웅***

Analysys of Thrust/Torque Signature of MOV

Ho Geun Ryu, Seong Keun Park and Dae Woong Kim

Key Words: Thrust/Torque, Motor Operated Valve(MOV, 모터구동밸브), Packing Thrust (패킹마찰력), Piston Effect(피스톤효과 힘), Valve Factor(밸브 팩터), Stem Factor(스텝 팩터), Differential Pressure(차압), Upstream Pressure(전단압력)

Abstract

For the evaluation of operability of MOV(Motor Operated Valve), the precision prediction of thrust/torque acting on the valve is important. In this paper, the analytical prediction method of thrust/torque was proposed. The design basis stem thrust calculation typically considers the followings : Packing thrust, Stem rejection load, design basis differential pressure load. In general, test results show that temperature, pressure, fluid type, and differential pressure, independently and combination, all have an effect on the friction factor. The prediction results of thrust/torque are well agreement with dynamic test results.

1. 서 론

우리나라에는 현재 16기의 원자력발전소가 국내 전체 전력 수요의 1/3 이상에 해당하는 전력을 생산하고 있으며, 원자력 발전에 대한 전력수급 의존도는 더욱 높아질 전망이다. 이에 따라 국민들의 원자력발전소에 대한 관심도 또한 급격히증대되고 있으며 원자력 안전성 확보는 원자력발전소의 운영에 있어서 최우선 과제이다.

국내 원전에서는 아직까지 중대한 사고가 발생하지 않았지만, 1979년 미국 펜실바니아주 Three Mile 섬에 위치한 TMI(Three Mile Island) 원전 사고 이후 미국의 원자력 산업계는 원자력 안전에 관하여 많은 연구를 수행하였으며 규제요건들이 발행되었다. TMI 사고의 주된 원인은 운전원

이 압력방출조절밸브가 열린 상태에서 다시 닫히지 않았다는 사실을 인지하지 못한 것이지만 모터구동밸브인 PORV 차단밸브를 닫았다면 사고의 심각성은 상당히 완화될 수 있었다는 분석이 나왔다.

위와 같이 모터구동밸브의 고장이 빈번히 발생함에 따라 미국 원자력규제위원회(NRC)에서는 IE-Bulletin 85-03을 발행하여 원자력 발전 사업자에게 안전 관련 모터구동밸브 제어 스위치의 설정값을 재평가하고 설계기준조건에서 밸브의 동작이 보장되도록 토크 스위치를 충분히 높게 설정하며 필요시 동적 시험을 수행할 것을 요구하였다. NRC는 규제요건인 GL 89-10을 발행하여 원전 사업자에게 모터구동밸브의 성능 입증에 대해 보다 강도 높은 요구를 하였으며 이에 따라 1995년까지 대부분의 원전 사업자가 모터구동밸브의 설계기준조건에서의 성능 입증을 완료하였다.

국내에서도 미국에서 발생한 모터구동밸브(MOV)와 동력구동게이트밸브(POGV)의 성능 장애 사례가 보고됨에 따라 1997. 6.13 과학기술부에서는 국내 원전 18기에 설치된 모든 안전 관련 동력구동밸브에 대해 미국 원전에서와 같이 밸브의 안전성 입증을 요구하는 규제 권고 사항 [과

* 한전 전력연구원
 ** 한전 전력연구원
 *** 한전 전력연구원

기부 원검 71233-203]을 발행하였다. 이 규제 권고 사항에는 2년 이내(~ 1999. 6.13)에 운영 및 건설 중인 원전에 설치된 모터구동밸브에 대한 검토 및 시험 계획서를 제출하고, 8년 이내 (~ 2005. 6.13)에 시험 결과보고서를 제출하며, 시험 대상 밸브에 대한 설계 기준 검토 결과를 시험 수행 2개월 전까지 제출할 것 등이 명시되어 있다. 또한, 동력구동게이트밸브에 대해서는 2년 이내에 압력잡감 및 열적고착 검토 계획서를 제출하고 5년 이내(~ 2002. 6.12)에 시정조치 보고서를 제출할 것을 요구하였다.

본 논문에서는 원자력발전소에서 사용되고 있는 모터구동밸브의 안전성 평가 수행에 사용되고 있는 밸브의 요구 쓰러스트/토크 분석 방법을 제시하고 동적 시험을 통한 결과 값과 비교해 보고자 한다.

2. 모터구동밸브의 요구 쓰러스트/토크 분석

2.1 게이트/글로브 밸브(Gate/Globe Valve)

게이트 밸브와 글로브 밸브의 스템 요구 쓰러스트 및 토크는 디스크와 스템의 무게에 의한 힘, 패킹 마찰력 및 피스톤 효과에 의한 힘, 차압에 의한 힘으로 구성되며, 상세 분석 방법은 다음과 같다.

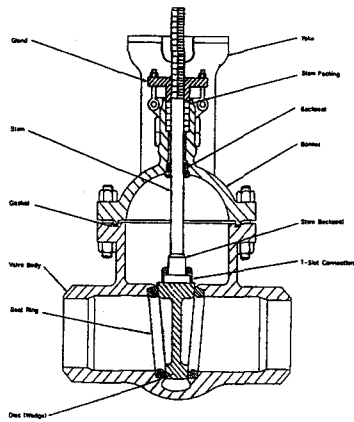


Fig. 1 Gate Valve

2.1.1 요구 쓰러스트(F_R) 계산

1) 디스크와 스템의 무게 (F_w)

대형 게이트 밸브에서 차압이 낮은 경우에는

중요하나 일반적으로 디스크와 스템의 무게는 다른 힘에 비하여 무시할 만하고 고려하지 않는 경우가 많다.

$$F_w = W_d + W_s \quad (\text{lbf}) \quad (1)$$

여기서, W_d : 디스크의 무게 (lbf)

W_s : 스템의 무게 (lbf)

2) 패킹 마찰력 (F_{pack})

패킹 마찰력은 패킹에서의 마찰 저항을 극복하기 위해 필요한 스템의 힘을 말하며, 패킹에서의 마찰 저항은 유동이 없는 정적 진단시험에서 가장 큰 부하가 된다. 실제 패킹 마찰력은 패킹과 스템 사이의 반경 방향 접촉 압력에 의해 결정되며, 이때의 접촉 압력은 일정한 값이 아니고, 패킹이 조여진 정도에 따라 달라진다.

$$F_{\text{pack}} = 1000 \times D_s \quad (\text{lbf}) \quad (2)$$

여기서, D_s : 스템 지름

3) 피스톤 효과힘 (F_p)

스스템을 바깥으로 밀어내려는 힘으로 밸브 시트 내부 지역에서의 압력에 의해 발생하며, 아래식과 같이 상류측의 압력과 스템 단면적의 곱으로 표시된다. 이 힘은 밸브가 열리는 경우 음의 값을 가지고 닫히는 경우는 양의 값을 가진다.

$$F_p = P_U \frac{\pi}{4} D_s^2 \quad (\text{lbf}) \quad (3)$$

여기서, P_U : 상류측의 압력(psi)

D_s : 스템 직경 (in)

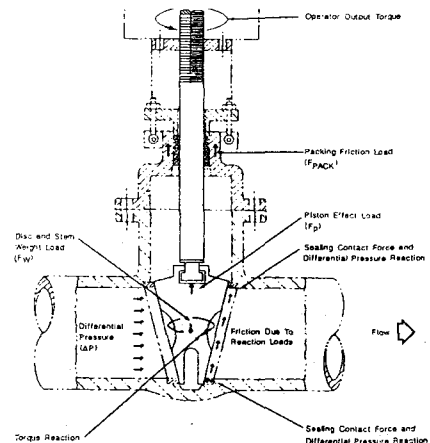


Fig. 2 Loads acting on gate valve

4) 차압에 의한 힘 (F_{DP})

밸브 디스크의 양단에 차압이 존재하는 경우 차압에 의해 발생하는 스템의 힘은 전체 필요한 스템 힘에 있어서 가장 중요한 요소이며, 각 부품의 재질에 따라 마찰계수가 다르고 또 디스크와 가이드의 기하학적 형태에 따라 접촉 모드에 의해 그 값이 달라지게 된다.

$$F_{DP} = VF \times A_o \times \Delta P \quad (\text{lbf}) \quad (4)$$

여기서,

VF : 밸브 팩터. 차압에 의한 힘뿐 아니라 밀봉력, 토크 반응을 모두 포함하는 값이다.

ΔP : 밸브 상류와 하류의 압력차 (psi)

5) 밸브 팩터(VF)

밸브 팩터는 밸브의 형태, 제작사, 모델에 따라 고유한 값을 가지나 서로 다른 정비 이력, 동작 여건에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 동적 시험을 통해서만 확인될 수 있다. 제작사가 제공하는 값이 없는 경우에는 EPRI Performance Prediction Program의 밸브 시험 결과, 산업계에서 사용하는 값을 사용하며 가능한 보수적인 값을 사용한다.

6) 요구 쓰러스트 (F_R)

1) ~4) 에서 구한 힘의 합이 차압이 존재하는 밸브에서 최소 요구 쓰러스트가 된다.

$$F_R = -F_W + F_{pack} + F_P + VF \times A_o \times \Delta P : \text{닫힘}$$

$$F_R = F_W + F_{pack} - F_P + VF \times A_o \times \Delta P : \text{열림}$$

----- (5)

2.1.2 요구 토크(T_R) 계산

1) 스템 팩터(SF)

요구 토크를 산출하기 위하여 스템 팩터를 구해야 하는데, 스템과 스템 너트의 나사산은 ACME 형태(ACME thread)를 가장 많이 사용하고 스템 팩터는 스템의 형상과 스템과 스템 너트 사이의 마찰계수에 의해 결정된다. ACME Thread인 경우 스템 팩터를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$SF = \frac{d(0.96815 \times \frac{l}{\pi \times d} + \mu_{th})}{2 \times 12(\frac{\text{in}}{\text{ft}})(0.96815 - \mu_{th} \frac{l}{\pi \times d})} \quad (\text{ft})$$

----- (6)

여기서, $d = (D_s - \frac{D}{2})$

l : 스템 리드

μ_{th} : 스레드 마찰 계수

미국에서의 시험수행결과 스레드 마찰계수는 0.15를 사용하는 경우 충분하다고 입증되었으므로, 초기계산에서는 마찰계수 0.15를 이용하여 스템 팩터를 구하며 정확한 스템 팩터는 정적 진단 시험을 통해 구해져야 한다.

2) 요구 토크

요구 토크는 앞에서 계산된 요구 쓰러스트와 스템 팩터를 곱해서 구한다

$$T_R = F_R \times SF \quad (\text{ft-lb}) \quad (7)$$

2.2 버터플라이 밸브(Butterfly Valve)

버터플라이 밸브에 대한 스템 요구 토크 분석은, 먼저 대상 밸브의 디스크 유형, 스템(shaft)의 위치, 시트(seat) 유형에 따라 다음과 같이 분류한 후, 각 유형에 적합한 계수나 분석 방법을 사용하여 구하게 된다.

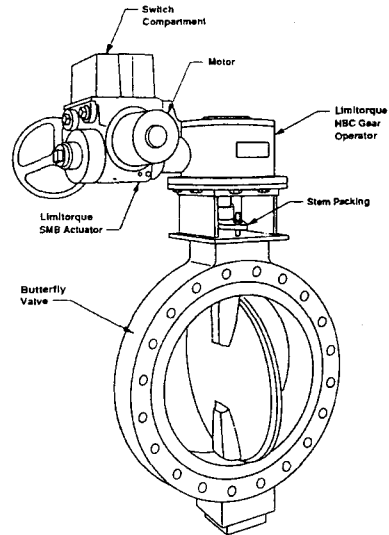


Fig. 3 Butterfly valve

2.2.1 요구 토크(T_R) 계산

버터플라이 밸브의 토크는 밸브 행정구간에 따라 크게 시팅/언시팅 토크(T_{TS} ; Total Seating/Unseating Torque)와 동적 토크(T_{TD} ; Total Dynamic Torque)로 구분할 수 있으며, 각각의 토크 특성 및 분석 방법은 다음과 같다.

1) 시팅/언시팅 토크(T_{TS})

시팅/언시팅 토크(T_{TS})는 밸브 디스크가 시트와 접촉하는 구간에서 요구되는 토크로 일반적으로 디스크가 완전히 닫혔을 때의 디스크 개도각

(α) = 0° 로부터 디스크 개도각(α)이 5° 이하인 구간에 대해 적용한다. 이 시팅/언시팅 토크는 베어링 토크(T_b), 시트 토크(T_s), 패킹 토크(T_p), 정수력 토크(T_h)로 구성되며, 각각의 특성 및 계산 방법은 다음과 같다.

(가) 베어링 토크(T_b ; Bearing Torque)

베어링 토크란 베어링에 의한 마찰력으로 항상 스템의 회전방향과 반대로 작용한다.

$$T_b = N_1 \times C_b \times \Delta P_0$$

$$= N_1 \times \mu_b \times \frac{\pi}{4} \times D_{disc}^2 \times \Delta P_0 \times \frac{D_s}{2}$$

----- (8)

(나) 시트 토크(T_s ; Seat Torque)

시트 토크(T_s)는 시트와 디스크 간의 마찰 토크를 의미하며, 항상 스템의 회전방향에 대해 반대로 작용한다.

$$T_s = N_1 \times (A + B \times \Delta P_{max}) \times D_{disc}^2$$

----- (9)

(다) 패킹 토크(T_p ; Packing Torque)

패킹에 의한 마찰토크를 의미하며, 그 작용 방향은 항상 스템의 회전방향과 반대로 작용한다.

$$T_p = N_1 (\mu_p) \times (\pi D_s l_p) \times \left(\frac{P_{pkg}}{2} \right) \times \left(\frac{D_s}{2} \right)$$

$$= \frac{\pi N_1}{4} \mu_p \times P_{pkg} \times D_s^2 \times l_p$$

----- (10)

(라) 정수력 토크(T_h ; Hydrostatic Torque)

정수력 토크(T_h)는 밸브 디스크 양단간의 유체 흐름의 정적 헤드의 차에 의해 발생하는 토크이다.

(마) 시팅/언시팅 토크(T_{TS})

(가)~(라)항목에서 구한 각각의 토크들을 합하여 시팅/언시팅 토크(T_{TS})를 구한다.

$$T_{TS} = T_b + T_s + T_p + T_h \quad (\text{ft-lb}) \quad (11)$$

2) 최대 동적 토크 (T_{TD_MAX})

동적 토크(T_{TD} ; Total Dynamic Torque)란 밸브의 열림/닫힘(Open/Close) 행정중 디스크와 시트가 접촉되지 않는 디스크 개도각(α) = 5° 이상에서부터 완전히 열렸을 때 디스크 개도각(α) = 90° 인 구간 사이에서 요구되는 각 디스크 개도 위치에서의 토크들의 합으로, 베어링 토크(T_b), 패킹 토크(T_p), 동수력 토크(T_{hyd} ; Hydrodynamic Torque)로 이루어진다.

(가) 행정에 따른 베어링 토크(T_{b_a})

베어링 토크란 베어링에 의한 마찰력으로 항상 스템의 회전방향과 반대로 작용하며, 밸브의 열림/닫힘(Open/Close) 전 행정에 대하여 각 디스크 개도각 α 에서의 베어링 토크(T_{b_a})를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T_{b_a} = N_1 \times C_b \times \Delta P_a$$

$$= N_1 \times \mu_b \times \frac{\pi}{4} \times D_{disc}^2 \times \Delta P_a \times \frac{D_s}{2}$$

----- (12)

(나) 행정에 따른 동수력 토크(T_{hyd_a})

동수력 토크(T_{hyd})는 유체 흐름에 따른 힘이며, 마찰 토크와는 달리 스템 회전방향에 관계없이 동일한 방향으로 작용하며, 스템의 회전 방향과 유체의 흐름 방향에 따라 한쪽 행정에서는 더해지고 반대행정에서는 빼진다.

$$T_{hyd_a} = N_1 C_t D_{disc}^3 \Delta P_a \quad (13)$$

(다) 행정에 따른 동적 토크(T_{TD_a})

디스크 개도각 α 에서의 동적 토크(T_{TD_a})는 베어링 토크(T_{b_a}), 패킹 토크(T_p), 동수력 토크(T_{hyd_a} or T'_{hyd_a})로 이루어지며, 동적 토크는 아래의 식을 이용하여 구한다

$$T_{TD_a} = T_{b_a} + T_p + T_{hub} + T'_{hyd_a}$$

----- (14)

3. 쓰러스트/토크 예측값 결과 및 토의

위에서 제시한 방법으로 예측한 게이트 밸브의 밸브 스템의 쓰러스트/토크와 버터플라이 밸브의 밸브 스템 토크값을 동적시험 결과와 비교 검토해 보았다.

3.1 게이트 밸브 스템 쓰러스트/토크

Fig. 4는 게이트 밸브의 열림 행정에서 스템에 미치는 쓰러스트를 나타내고 있는데, 밸브가 열리는 초기에 Unseating에 의한 쓰러스트의 Peak 값이 나타나며, 밸브 disk가 seat에서 빠지고 난 후에는 밸브 전후단의 차압에 의한 힘, 피스톤

효과 힘, 패킹 마찰력에 의한 힘이 복합적으로 스템에 작용하게 된다.

동적 시험의 경우에는 Unseating에 의한 쓰러스트 Peak치가 나타난 후 밸브로의 유량이 형성되며 밸브의 개도가 커짐에 따라 밸브 전후단의 압력차가 점점 감소함에 따라 차압이 밸브 디스크에 미치는 힘이 작아져 밸브 스템에 미치는 쓰러스트가 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

밸브가 어느 정도 열린 후에는 밸브 전후단의 차압이 일정하게 유지되며 이 구간에서는 밸브 스템에 미치는 힘이 변하지 않게 된다.

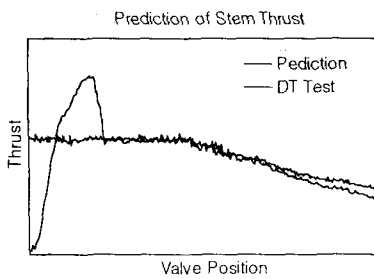


Fig. 4 Stem Thrust with valve position (Opening Stroke)

쓰러스트를 예측한 계산 값은 밸브의 열림 행정 초기에는 동적 시험의 결과와 매우 잘 일치하지만 밸브의 개도가 증가함에 따라 예측값과 동적시험값이 차이를 보이는데 이는 동적 시험시 밸브 전후단의 차압이 정확히 측정되지 못함에 기인한다.

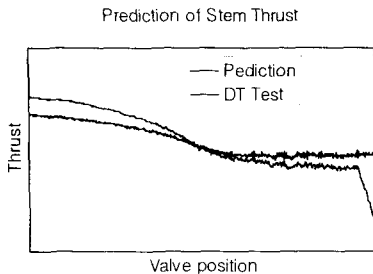


Fig. 5 Stem Thrust with valve position (Closing Stroke)

Fig. 5는 게이트 밸브의 닫힘 행정에서 스템에 미치는 쓰러스트를 보여주고 있다. 여기서 음

의 부호는 스템에 미치는 쓰러스트가 압축력을 의미한다. 닫힘 행정 약 70 - 80% 정도까지는 밸브 전후단의 차압이 변화가 거의 없으나 닫힘 행정이 더욱 진행함에 따라 밸브 전후단의 차압도 급격히 증가하게 된다. 이러한 밸브 전후단 차압의 증가는 Fig. 5에서 보여지듯이 닫힘 행정의 마지막 부분(80-100%)에서 쓰러스트의 급격한 증가를 유발한다.

Fig. 6은 동적시험시 측정된 게이트 밸브의 스템 쓰러스트 신호이다.

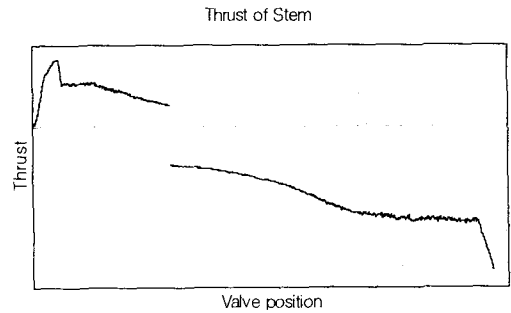


Fig. 6 Signature of valve Stem Thrust (Gate valve)

3.2 버터플라이 밸브 스템 토크

Fig. 3은 원자력발전소에서 일반적으로 사용하고 있는 버터플라이 밸브이다. 그림에서 보듯이 버터플라이 밸브의 구조상 밸브 스템에는 열림 및 닫힘 행정시에 토크만 작용하게 된다.

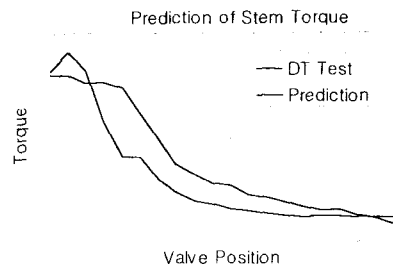


Fig. 7 Stem torque with valve position (Butterfly valve)

밸브 스템에 미치는 토크는 밸브가 시트에서 빠져나오기 위한 시팅/언시팅 토크와 밸브 행정

중의 동적 토크로 크게 구분되는데 밸브 전후단의 차압이 작을 경우에는 시팅/언시팅 토크가 동적 토크보다 크며, 차압이 클 경우에는 일반적으로 동적 토크가 시팅/언시팅 토크보다 크게 된다.

동적 토크는 행정중의 차압에 비례하며 이는 동적 토크를 구성하고 있는 베어링토크, 동수력 토크가 차압에 비례하여 커지기 때문이다.

Fig. 7에는 버터플라이 밸브의 스템에 미치는 토크를 표시하였다. 그림에서 보면 열림 행정 초기에 가장 큰 토크가 발생하며 밸브 개도가 증가함에 따라 토크가 점점 작아짐을 볼 수 있는데 이는 행정 초기에 밸브 전후단의 차압이 가장 크며 밸브가 열리면서 차압이 점점 감소함에 기인한다. 동적 시험 결과와 토크 예측 값이 다소 차이를 보이는데 이는 밸브 동적 시험시 밸브 전후단의 차압과 예측에 사용된 차압과의 차이, 베어링 마찰 계수등 예측에 사용된 상수들과 실제 값들과의 차이에서 기인한다.

Fig. 8은 동적 시험시 측정된 버터플라이 밸브의 스템에 미치는 토크 신호이다.

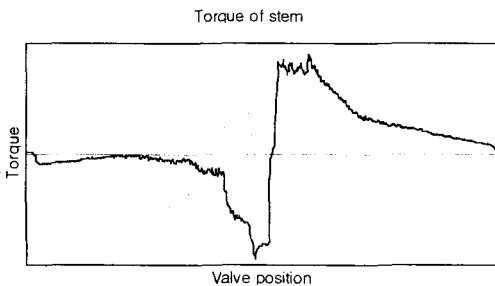


Fig. 8 Stem Torque with valve position (Butterfly Valve)

4. 결론

원자력 발전소 모터구동밸브의 운전 안전성 평가하기 위해서는 밸브에 미치는 각 힘의 요소들을 정확히 예측하고 이에 맞는 적절한 구동기 선정과 제어스위치 설정이 필수적이다.

일반적으로 밸브의 운전 안전성은 정적 시험 및 동적 시험을 통하여 확인할 수 있지만, 경제적인 요인이나 발전소 여건상 동적 시험을 할 수 없는 경우에는 해석적 방법으로 밸브의 운전

에 필요한 힘을 예측하여야만 한다. 위에서 제시한 쓰러스트/토크 예측 방법론은 EPRI에서 개발한 방법론으로서 동적시험과 비교적 잘 일치함을 보여 주고 있다. 일반적으로 밸브에 미치는 힘은 유체 온도, 유체의 종류, 밸브 전후단의 차압들이 복합적으로 작용한다. 따라서 향후 보다 정확한 예측을 위해서는 좀더 많은 시험과 data 분석을 통한 새로운 예측방법론의 개발이 필요하다.

참고문헌

- (1) Donovan Bramwell and Kevin DeWall, 1999, "Understanding Motor-Operated Valve", INEEL/EXT-99-00485
- (2) R.C. Sanders and K.J. Wolfe, 1994, "Butterfly valve model description report", EPRI TR-103224
- (3) J.K. Wang and P.D. Alvarez, 1999, "Application guide for MOV in nuclear power plant", EPRI TR-106563-V1
- (4) 박성근, 박수기, 정희권, 2001, "2000년도 전원전 안전성 평가 대상 모터구동밸브 최종평가 결과", '01-전력연-단096 TM.99NE14.R2001.093